

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV TELEKOMUNIKACÍ

DEPARTMENT OF TELECOMMUNICATIONS

NÁVRH PSEUDO-DIFERENČNÍCH KMITOČTOVÝCH FILTRŮ S VYUŽITÍM KONVEJORŮ

DESIGN OF PSEUDO-DIFFERENTIAL FREQUENCY FILTERS USING CONVEYORS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

František Hýl

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Ondřej Sládok

BRNO 2019

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor Audio inženýrství
Ústav telekomunikací

Student: František Hýl

Ročník: 3

ID: 186809

Akademický rok: 2018/19

NÁZEV TÉMATU:

Návrh pseudo-diferenčních kmitočtových filtrů s využitím konvektorů

POKyny PRO VYPRACOVÁNÍ:

Cílem bakalářské práce je návrh pseudo-diferenčních kmitočtových filtrů s využitím konvektorů a prostudování vlastností těchto struktur v napěťovém a proudovém režimu. Na základě získaných vědomostí navrhnete funkční pseudo-diferenční kmitočtové filtry pomocí programu SNAP. Vhodná řešení analyzujete a podrobte je simulacím v programu OrCAD. Nejvhodnější řešení kmitočtového filtru ověříte experimentálním měřením. Výsledky porovnejte se simulacemi a teoretickou analýzou.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] O. Sladok, J. Koton, N. Herencsar, „Universal Pseudo-Differential Filter Using DDCC and DVCCs“. Elektronika Ir Elektrotechnika, 2017, vol. 23, no. 6, p. 46-52. ISSN: 1392-1215. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.5755/j01.eie.23.6.19684>

[2] J. Koton, N. Herencsar, O. Sladok, J. Horng, „Pseudo-differential second order band reject filter using current conveyors“. AEU - International Journal of Electronics and Communications, vol. 70, no. 6, pp. 814-821, 2016. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1016/j.aeue.2016.03.009>

Termín zadání: 1.2.2019

Termín odevzdání: 27.5.2019

Vedoucí práce: Ing. Ondřej Sládok

Konzultant:

prof. Ing. Jiří Mišurec, CSc.
předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Vysoké učení technické v Brně / Technická 3058/10 / 616 00 / Brno

ABSTRAKT

Tato bakalářská práce se zabývá pseudo-diferenčním kmitočtovým filtrem druhého řádu pracujícím v napěťovém režimu. Dále se věnuje popisu různých typů kmitočtových filtrů a jejich charakteristikám. Obsahuje souhrn informací o rozdílech mezi Pseudo-diferenčními, plně diferencními a nediferenčními filtry a jejich zapojení. Pseudo-diferenčnímu filtru typu horní propust jsou v práci věnovány kapitoly návrhu, simulace a měření.

KLÍČOVÁ SLOVA

Pseudo-diferenční filtr, diferencní filtr, CMRR, PSRR, THD, selektivní filtry, dolní propust, horní propust, pásmová propust, pásmová zadrž, nediferenční filtry

ABSTRACT

This bachelor thesis deals with a second order pseudo-differential frequency filter operating in voltage mode. It also describes various types of frequency filters and their characteristics. It contains a summary of the differences between Pseudo-differential, fully differential and non-differential filters and their involvement. The pseudo-differential filter of the high-pass type is devoted to chapters of design, simulation and measurement.

KEYWORDS

Pseudo-differential filters, differential filters, CMRR, PSRR, THD, selective filters, low-pass filter, high-pass filter, band-pass filter, band-stop filter, non-differential filters

Hýl, F. Návrh pseudo-diferenčních kmitočtových filtrů s využitím konvektorů. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Ústav telekomunikací, 2019. Vedoucí práce: Ing. Ondřej Sládok

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma Návrh pseudo-diferenčních kmitočtových filtrů s využitím konvektorů jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne

.....

(podpis autora)

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval vedoucímu bakalářské práce panu Ing. Ondřeji Sládokovi za odborné vedení, konzultace, podnětné návrhy k práci, a hlavně za jeho trpělivost

V Brně dne

.....

(podpis autora)

OBSAH

Seznam obrázků

Seznam tabulek

Úvod	1
1 Kmitočtové filtry	2
1.1 Základní dělení filtrů	3
1.2 Pasivní a aktivní filtry	3
1.3 Selektivní filtry	4
1.3.1 Dolní propustnost – DP	4
1.3.2 Horní propustnost – HP	4
1.3.3 Pásmová zadrž – PZ	4
1.3.4 Pásmová propust – PP	5
1.3.5 Fázovací členek – FČ	5
1.4 Přenosové funkce	6
2 Pseudo-diferenční Filtry	7
2.1 Pseudo-diferenční a plně diferenční	7
2.2 Nediferenční filtry	8
2.2.1 Nediferenční přenos	8
2.3 Diferenční filtry	9
2.3.1 Návrh diferenčních struktur	9
2.4 Potlačení souhlasné složky	9
2.5 Potlačení nežádoucího napájecího signálu	10
3 Proudové konvejory	10
3.1 Proudové konvejory (CCII / III, DDCC)	11
3.2 Univerzální proudový konvektor (UCC)	12
4 Realizace navrhnutých filtrů	14
4.1 Návrh pseudo-diferenčního filtru horní propusti pracující v napěťovém režimu	14
4.1.1 Přenosová funkce filtru horní propust	14

5	Praktické měření	16
5.1	Měření a simulace pseudo-diferenčního filtru pracujícího v napětovém režimu.	18
5.1.1	Porovnání modulů při poklesu napájení PSRR.....	19
5.1.2	Měření CMRR	21
5.1.3	Měření celkového harmonického zkreslení.	22
5.1.4	Měření fáze	23
6	Závěr	24
	Literatura	26
	Seznam symbolů, veličin a zkratk	28
	Seznam příloh	29

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 2-1: Obecný diferenční dvojbran se znázorněnými vstupními a výstupními veličinami.....	7
Obr. 2-2: Obecný dvojbran se znázorněnými vstupními a výstupními veličinami ...	8
Obr. 3-1: schématická značka CCII	11
Obr. 3-2: schématická značka DDCC	12
Obr. 3-3: schématická značka UCC	13
Obr. 3-4: Zjednodušená vnitřní struktura UCC.....	13
Obrázek 4-1: Schéma návrhu pseudo-diferenčního filtru typ HP	14
Obr. 4-2: Graf simulace horní propusti při ideálním průběhu a simulace třetí úrovně	15
Obr. 4-3: Graf simulace horní propusti při ideálním průběhu a simulace třetí úrovně pro mezní kmitočet 500 kHz.....	16
Obr. 5-1: Blokové schéma měření.....	17
Obr. 5-2: Modulová charakteristika pseudo-diferenčního filtru horní propust pro 50 kHz.....	18
Obr. 5-3 Modulová charakteristika pseudo-diferenčního filtru pro mezní kmitočet 500 kHz	19
Obr. 5-4: Graf modulu při poklesu napájení při $f_0=50\text{kHz}$	20
Obr.5-5: Graf modulu při poklesu napájení při $f_0=500\text{kHz}$	20
Obr. 5-6: Graf CMRR při mezním kmitočtu $f_0=50\text{ kHz}$	21
Obr. 5-7: Graf CMRR při mezním kmitočtu $f_0=500\text{ kHz}$	21
Obr. 5-8: Graf průběhu THD pro mezní kmitočty 50 kHz / 500 kHz.....	22
Obrázek 6-1: Schéma zapojení pseudo-diferenčního filtru.....	30

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1: Matematický popis filtrů 2. řádu – koeficienty a_2, a_1, a_06

Tabulka 2: Koeficienty b_2, b_1, b_06

ÚVOD

Tato bakalářská práce pojednává o návrhu pseudo-diferenčních filtrů pracujících v napěťovém režimu. Analogové obvody v proudovém režimu bývají díky svým výhodám (šířka pásma, nízký výkonový odběr, jednoduchý systém konstrukce) často využívány při navrhování obvodů. V první části práce se popisuje základní dělení filtrů podle využitých součástek na pasivní a aktivní filtry, selektivní filtry typu DP, HP, PZ, PP, FČ a jejich vlastnosti.

Další část práce se zabývá teorií o pseudo-diferenčních filtrech, dále o nediferenčních filtrech a plně diferencčních filtrech. Jsou popsány jejich rozdílné přenosové vlastnosti, výhody, či nevýhody. U pseudo-diferenčních a plně diferencčních filtrů jde o schopnost potlačení stejnosměrné složky oproti nediferenčním filtrům. Oproti plně diferencčním filtrům zase mají pseudp-diferenční výhodu v menším počtu prvků v návrhu, jednoduchosti zapojení, nižší ceně a náročnosti obvodu.

Třetí kapitola se zabývá teorií o aktivních prvcích a je v ní kladen důraz na použití proudových konvektorů. Kapitola pojednává také o jejich vnitřní struktuře, funkčnosti a zapojení.

Ve čtvrté kapitole je popsán již samotný navržený pseudo-diferenční filtr pracující v napěťovém režimu. Je zde uvedeno, jak následně byl tento filtr podroben simulacím v OrCadu a porovnán s teoretickými poznatky. U ověření funkčnosti se zmiňuje, zdali navržený filtr druhého řádu dosahuje funkčnosti.

Pátá kapitola zobrazuje experimentální měření pseudo-diferenčního filtru horní propust. Filtr je porovnán se simulacemi a následně s teorií. Ověří se v praxi funkčnost návrhu. Je vyhodnoceno potlačení stejnosměrného signálu – CMRR a PSRR – snížení napájecího napětí a harmonické zkreslení signálu.

1 KMITOČTOVÉ FILTRY

Filtry prostupují celým spektrem elektroniky a elektrotechniky. Slouží k propouštění nebo zesílení zvoleného spektra frekvence, zatímco dochází k utlumení ostatních rušivých, či nežádoucích frekvencí nepatřících do vybrané pracovní oblasti filtru. Jsou známy různé druhy kmitočtových filtrů, jako jsou aktivní, pasivní, nebo třeba selektivní filtry. Na konstrukci pasivních filtrů jsou použity základní pasivní součástky. Odpor, kondenzátory a induktory. Pasivní filtry se skládají z prvků R/L/C. Ovšem lze narazit na konstrukční limity, kdy pasivní konstrukce nenabízí potřebné vlastnosti, a proto se začaly používat aktivní filtry. Aktivní prvky jsou schopné pracovat s nižšími frekvencemi blízkými se téměř k 0 Hz, také dokáží případně poskytnout zesílení napětí. [1]

Aktivní filtry jsou konstruovány pomocí operačních zesilovačů (OZ), transkondukčních zesilovačů (OTA), proudových (CC) a napěťových (VC) konvektorů. Tyto aktivní prvky jsou poté doplněny o pasivní součástky – R/C. Aktivní filtry jsou využívány především kvůli přeladitelnosti nebo nastavitelnosti. [2]

U každého filtru se rozlišuje n-řád filtru, který určuje, s jakou věrností se filtr blíží ideálnímu filtru. Vyrůstá tedy strmost, s jakou přechází z nepropustného pásma do propustného, či obráceně. S rostoucím řádem vyrůstá složitost návrhu. U pasivních filtrů je dán řád filtru počtem kondenzátorů nebo induktorů. [1][2]

U filtrů se určuje přenos v propustném pásmu K_0 . Parametr Q – činitel jakosti potom určuje kvalitu filtru. Mezní kmitočet f_0 určuje frekvenci, od které filtr propouští nebo omezuje pásmo. V tomto bodě je pokles – 3 dB a od tohoto bodu se počítá strmost přenosu $n \cdot -20 \text{ dB/dekáda}$. [2]

V praxi se s filtry setkat v různých odvětvích např.:

1. *Audio technice*: Ve výhybkách, které představují skupinu filtrů rozdělujících signál na tři základní složky. Nízké frekvence – basy, střední frekvence – středové reproduktory, vysoké frekvence – výškové reproduktory. Využívají se zde také jako korekční filtry – ekvalizér. Dále slouží k potlačení brumu a šumu.

2. *Rádiové komunikace*: Filtry dovolují přijímačům přijímat jen pouze potřebný signál s potlačením nepotřebného signálu.

3. *Napájecí zdroje stejnosměrného napětí:* Zde se filtry používají k odstranění nežádoucích vysokých frekvencí a slouží také k odstranění šumu na vstupu. Na výstupu slouží ke snížení zvlnění.

4. *A/D převod:* – filtr na vstupu ADC k minimalizaci aliasingu. [1][4]

1.1 Základní dělení filtrů

Filtry lze dělit podle:

1. součástek, které byly použity při konstrukci, a to na filtry aktivní nebo na filtry pasivní.
2. Z hlediska zpracování signálu je můžeme dělit na filtry diferenční a nediferenční.
3. Další dělení je z hlediska propustnosti na filtry selektivní. [2]

1.2 Pasivní a aktivní filtry

Pasivní filtry jsou realizované pomocí součástek R/L/C a nejvíce jsou citlivé na frekvenčním rozsahu přibližně od 100 Hz do 300 MHz. Dolní mez je dána velikostí kapacitoru nebo indukčnosti, kde by musely tyto součástky dosahovat poměrně vysokých hodnot. Horní mez je ovlivněna parazitní kapacitou a indukčností. Určité konstrukční postupy umožňují použití pasivních obvodů v rozsahu GHz. Ovšem lze narazit na konstrukční limity, kdy pasivní konstrukce nenabízí potřebné vlastnosti, a proto se začaly používat aktivní filtry. [1]

Aktivní prvky jsou schopné pracovat s nižšími frekvencemi blízcími se téměř k 0 Hz, také dokáží případně poskytnout zesílení napětí. Aktivní filtry jsou konstruovány pomocí operačních zesilovačů (OZ), transkonduktačních zesilovačů (OTA), proudových (CC) a napětíových (VC) konvektorů. Tyto aktivní prvky jsou poté doplněny o pasivní součástky – kapacitory a rezistory. Cívky se zde většinou nevyskytují, protože by na nižších frekvencích byly velké a méně kvalitní. Aktivní filtry mají tedy dobrou kmitočtovou a amplitudovou stabilitu a jsou využívány především kvůli přeladitelnosti nebo nastavitelnosti, případně možnosti zesílit, nebo zeslabit signál. Aktivní RC filtry pracují v širokém kmitočtovém spektru v rozsahu desítek Hz až MHz. [1][2]

1.3 Selektivní filtry

Funkcí selektivních filtrů je vybrat z celku určené spektrum signálu, a poté jej přivést na výstup s minimálním útlumem. Signály nepatřící do užitečného frekvenčního spektra potlačí s maximálním útlumem. A tak se jejich název odvíjí od frekvence, kterou propouští na výstup. Proto se spíše zažil název frekvenční filtr. [1]

Dělíme je tedy na dolní propust (DO), horní propust (HP), pásmovou propust (PP), pásmovou zádrž (PZ), fázovací článek (FČ). Filtry mají mezní kmitočet (f_m), kdy se začne signál propouštět, potlačovat nebo vybírat. [2][3]

1.3.1 Dolní propustnost – DP

Je charakteristická tím, že kmitočtové složky menší, než mezní kmitočet (f_m) jsou propouštěny. Dojde k poklesu modulové charakteristiky signálu o 3 dB a vyšší signály nad mezním kmitočtem se potlačují.

Tento filtr se často využívá v audiotechnice jako ve výhybkách u repro soustav k oddělení nižších (basových) signálu a nasměrování do basových reproduktorů. Slouží také k potlačení rušivých vyšších frekvencí-šumů, nebo také v usměrňovačích. [2][4][5]

1.3.2 Horní propustnost – HP

Filtr, který propouští frekvence o vysokých kmitočtech, které jsou nad mezním kmitočtem f_m a frekvencí pod f_m , potlačuje. [1] Jeho využití prostupuje celým spektrem elektrotechniky. Opět jej lze nalézt v audiotechnice (např. výhybka reproduktoru), měřící elektronice, používá se k odrušení nízko frekvenčního brumu.[2] [3][6]

1.3.3 Pásmová zádrž – PZ

Filtr, u kterého dochází k potlačení frekvenčního pásma nad mezním kmitočtem f_{m1} a pod mezním kmitočtem f_{m2} . [1] Jsou dva druhy zapojení, a to pasivní a aktivní. Pasivní zapojení má nevýhodu ztrátového přenosu, proto je lepší variantou aktivní provedení, kdy je v obvodu použit operační zesilovač, který zajišťuje bezztrátový přenos. Pásmová zádrž je definována až funkcí 2. řádu a pro další sudé mocniny. U PZ se objevuje nová hodnota

B, která určuje šířku pásma.

Využívá se v audiotechnice k potlačení nechtěné zpětné vazby. Taktéž jej lze využít při jakékoliv konstrukci, kde je potřeba blokovat nežádoucí frekvence. [2][8]

1.3.4 Pásmová propust – PP

Filtr, který má opačnou vlastnost jako pásmová zadrž. Frekvence pod mezním kmitočtem f_{m1} a nad mezním kmitočtem f_{m2} jsou propouštěny. Pásmové propusti je využíváno například v generátorech sinusového napětí. I u PP se objevuje šířka pásma. [1][2][7]

1.3.5 Fázovací článek – FČ

V celém frekvenčním pásmu stejný zisk, ale dochází ke změně fázového vztahu mezi frekvencemi a dochází k fázovému posuvu. Filtr je popsán frekvencí, při které fázový posuv překračuje 90° . Filtr se tedy většinou využívá pro kompenzaci nežádoucích fázových posuvů v systému. [2][9]

1.4 Přenosové funkce

Matematický popis všeobecných přenosových funkce filtr 2. řádu

$$K_{(p)} = \frac{a_2 p^2 + a_1 p + a_0}{b_2 p^2 + b_1 p + b_0}$$

Tabulka 1 obsahuje hodnoty koeficientů a_2 , a_1 , a_0 pro vytvoření přenosových funkcí pro frekvenční filtry DP, HP, PP, PZ, FČ.

Typ filtru	a_2	a_1	a_0
Dolní propust	0	0	$K_0 \omega_0^2$
Horní propust	K_0	0	0
Pásmová propust	0	$K_0 \omega_0 / Q$	0
Pásmová zadrž	K_0	0	$K_0 \omega_0^2$
Fázovací článek	1	$-\omega_0 / Q$	ω_0^2

Tabulka 1: Matematický popis filtrů 2. řádu – koeficienty a_2 , a_1 , a_0

Koeficienty b_2 , b_1 , b_0 mají hodnoty popsané v tabulce 2

b_2	b_1	b_0
1	$\frac{\omega_0}{Q}$	ω_0^2

Tabulka 2: Koeficienty b_2 , b_1 , b_0

$K(p)$ je přenos napětí, p je komplexní kmitočet a lze jej vyjádřit jako $j\omega$, $\omega_0 = 2\pi \cdot f_0$, kdy f_0 představuje mezní kmitočet a Q je činitel jakosti. Řád filtru určuje jeho strmost a přesnost. Čím vyšší řád, tím více se filtr blíží ideálnímu průběhu. [1][2][10]

2 PSEUDO-DIFERENČNÍ FILTRY

V současné době v analogové technice je velkým trendem veškeré analogové struktury, či zapojení zmenšovat. S tím samozřejmě souvisí snižování napájecího napětí. U kmitočtových filtrů tomu není jinak. Pseudo-diferenční kmitočtové filtry kombinují vlastnosti jejich nejbližších zapojení, čímž jsou nediferenční a plně diferenční kmitočtové filtry. Má dva vstupy a dva výstupy, ale již neobsahuje plně diferenční strukturu. Vnitřní struktura zapojení zůstává nediferenční při zachování kladných vlastností diferenčního zapojení. Tento způsob zapojení má stále dostatečné potlačení CMRR složky, při méně komplexní struktuře zapojení. [2] [11][12]

2.1 Pseudo-diferenční a plně diferenční

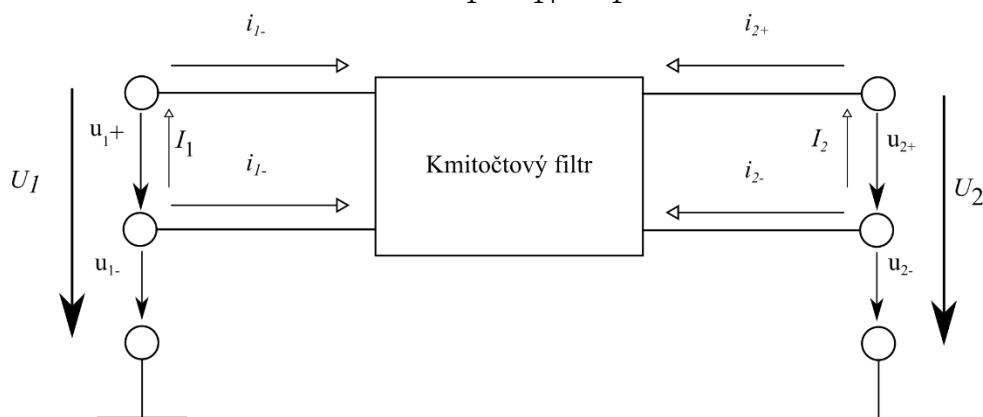
Pseudo-diferenční a plně diferenční napěťový přenos je definovaný jako poměr výstupního diferenčního napětí ke vstupnímu diferenčnímu napětí. Stejně pravidlo platí i při proudových přenosech, ovšem výsledek má opačné znaménko.

Rovnice napěťově přenosové funkce pro diferenční strukturu:

$$K_u = \frac{U_2}{U_1} = \frac{u_{2+} - u_{2-}}{u_{1+} - u_{1-}},$$

Rovnice proudové přenosové funkce pro diferenční strukturu:

$$K_i = -\frac{I_2}{I_1} = \frac{i_{2+} - i_{2-}}{i_{1+} - i_{1-}}$$



Obr. 2-1: Obecný diferenční dvojbran se znázorněnými vstupními a výstupními veličinami

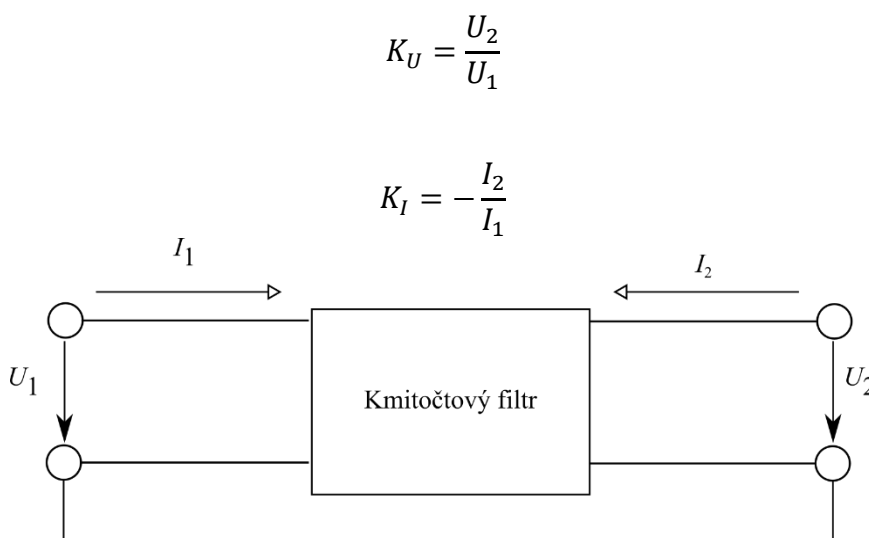
2.2 Nediferenční filtry

Nediferenční zapojení (Single-ended) zpracovávají nesymetrický (unbalanced) signál vůči zemi. Jsou jednodušší na návrh, následnou konstrukci a bývají převážně málo nákladné. Pro většinu aplikací jsou nediferenční filtry dostačující. V těchto zapojeních je jeden vstup a jeden výstup. Na vstupu a výstupu je jeden pin pro signál a druhý pin slouží jako společná zem. Tato zapojení jsou vhodná, pokud jsou přijímač a vysílač blízko sebe, nejlépe na jedné desce, protože při větší vzdálenosti dochází ke ztrátě funkčnosti. Nevýhodou u těchto zapojení je náchylnost na DC offset a šum v signálové cestě, který snižuje dynamický rozsah vstupního signálu. [2][11]

2.2.1 Nediferenční přenos

Napěťový přenos je vyjádřený jako poměr napětí na výstupu U_2 a napětí na vstupu U_1 . Tento přenos je vyjádřen rovnicí.

Proudový přenos je popsán stejnou rovnicí, a to tedy poměrem výstupního proudu I_2 a vstupního proudu I_1 . V některých publikacích dochází k návrhům, že proud I_2 vytéká z výstupu a rovnice pro přenos proudu je tak kladná.



Obr. 2-2: Obecný dvojbran se znázorněnými vstupními a výstupními veličinami

2.3 Diferenční filtry

Diferenční filtry zpracovávají symetrický (balanced) signál. Diferenční zapojení má několik výhod. V základu je to zvýšení CMRR (Common-mode rejection ratio), což je potlačení nežádoucího souhlasného signálu. Dále snižuje harmonické zkreslení signálu a potlačuje šum napájecího zdroje (PSRR). Nevýhodou diferenčních filtrů je větší množství prvků použitých při konstrukci (většinou dvojnásobný). Zapojení se tím stává složitější a také je potřeba na vstupu mít diferenční signál, který používají jen některá zařízení.

Na vstupu a výstupu diferenčního filtru je diferenční signál (rozdílový). Diferenční filtry dále lze rozdělit na plně diferenční (Fully-Differential), které jsou svojí obvodovou strukturou a zapojením diferenční a pseudodiferenční (Pseudo-Differential), které svým zapojením odpovídají diferenčním filtrům, ale vnitřní struktura diferenční není.[2][11][12]

2.3.1 Návrh diferenčních struktur

Diferenční filtry lze navrhovat cíleně od počátku návrhu, nebo můžeme použít nejpoužívanější a nejběžnější způsob návrhu a tím je transformace již navržených nediferenčních struktur na strukturu diferenční. Transformace proběhne zrcadlením nediferenční struktury vůči zemi. Počet pasivních prvků se zvýší, a to většinou na dvojnásobek. U aktivních prvků, které nemají diferenční vstupy a výstupy, využijme diferenční prvky. Aktivní prvky bývají osou souměrnosti a zapojení tak tvoří symetrický celek. Využitím této metody je potřeba určit hodnoty pasivních prvků, u kterých došlo k zrcadlení. Při určování hodnot musíme vycházet ze zvoleného druhu transformace. Tyto druhy jsou dva, a to transformace podélných struktur nebo transformace příčných struktur. [2][11][12]

2.4 Potlačení souhlasné složky

Potlačení souhlasné složky neboli CMRR (Common-mode rejection ratio) je parametr, který měří schopnost aktivního prvku nebo diferenční struktury potlačit souhlasnou složku na obou vstupních pinech. V ideálních případech by mělo CMRR dosahovat nekonečna, avšak v praxi je nemožné toho dosáhnout. CMRR je definován

jako poměr diferenčního zesílení k zesílení souhlasného signálu,

$$\text{CMMR [dB]} = 20\log \frac{A_d}{A_{cm}},$$

V rovnici představuje A_d diferenční zesílení a A_{cm} zesílení souhlasného signálu. Čím větší je potlačení souhlasného signálu, tím vzniká menší šum.[13]

2.5 Potlačení nežádoucího napájecího signálu

Potlačení nežádoucího napájecího signálu neboli PSRR (Power supply rejection ratio) určuje množství nežádoucího šumu od zdroje napájení, který je aktivní prvek nebo diferenční struktura schopna potlačit. PSRR je definováno poměrem změny napájecího napětí a změny výstupního napětí.

PSRR je popsáno následující rovnicí:

$$\text{PSRR[dB]} = 20\log \frac{\Delta V_{\text{zdroj}}}{\Delta V_{\text{výstup}}},$$

V rovnici je ΔV_{zdroj} změna napájecího napětí a $\Delta V_{\text{výstup}}$ je změna výstupního napětí.[1]

3 PROUDOVÉ KONVEJORY

Použitím aktivních filtrů můžeme realizovat filtry v oblasti nízkých kmitočtů (do jednotek MHz) s velmi vysokou kvalitou bez použití induktorů. Některé typy filtru, lze sestavit i za pomoci kapacitorů a rezistorů, ale nedocílíme tak vysoké jakosti filtru. Pro vysoké kmitočty není problém využití induktorů, ale pro nízké kmitočty jsou potřeba indukty s velkou indukčností. V tomto případě jsou indukty rozměrné, špatně se realizují a mají zhoršené elektrické parametry. Proto se použití kapacitorů při nízkých kmitočtech lze vyhnout, použitím filtru RC společně s aktivními prvky jako jsou např. operační zesilovače. Tyto filtry pak nazýváme aktivní RC filtry.

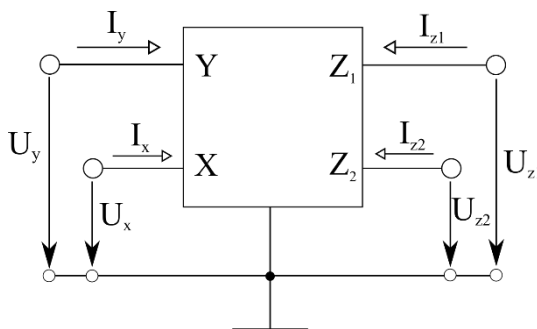
V současnosti se věnuje velká pozornost filtrům s využitím nových aktivních prvků jako jsou proudové a napěťové konvejory (CCx, ICC, UCC, DVCC, atd.), či dále pak tansimpedanční zesilovač (OTA, BOTa, MOTa). V těchto zapojeních se ve vnitřních strukturách používají nové principy, které umožňují prvkům pracovat na velmi vysokých

kmitočtech (až stovky MHz). Pracovní oblast filtrů se přesouvá k vyšším kmitočtům. [2]

3.1 Proudové konvejory (CCII / III, DDCC)

Proudové konvejory existují v několika generacích. Jsou první generace (CCI), druhé generace (CCII) a třetí generace (CCIII). Z těchto základních konvejořů vzniklo velké množství poddruhů, které se liší v orientaci a počtu výstupních a vstupních svorek atd.

Proudový konvejoř druhé generace CCII Obr. 3-1 je konstruován jako čtyřbran. Má vysoko impedanční napěťový vstup Y, nízko impedanční vstup X a dva vysoko impedanční výstupy Z_1 a Z_2 .



Obr. 3-1: schématická značka CCII

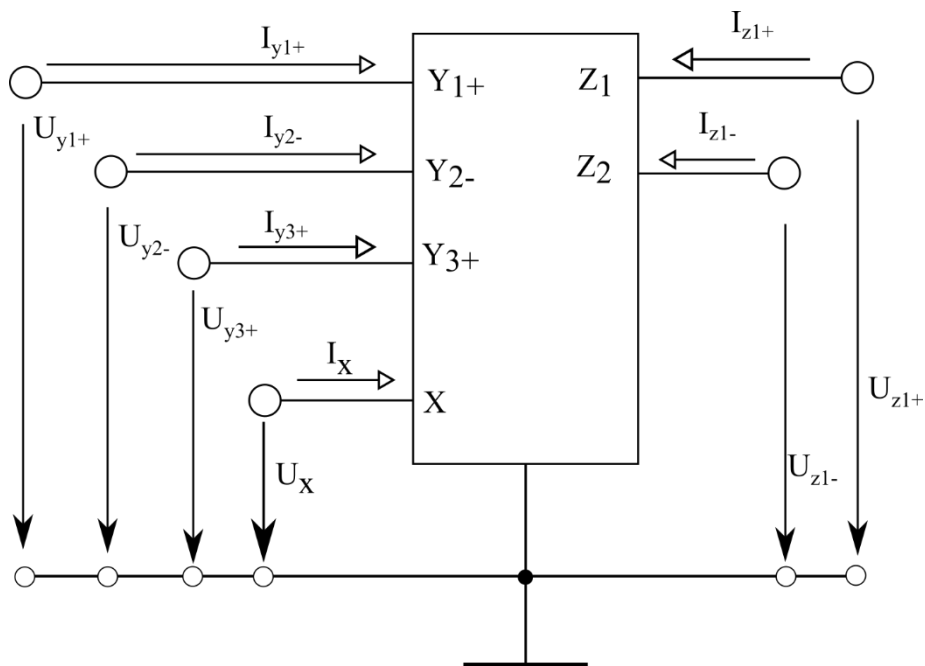
Vztahy mezi jednotlivými bránami:

$$U_x = U_y, I_y = 0,$$

$$I_{z1} = I_x, I_{z2} = -I_x,$$

CCII může být použit jako zesilovač napětí, ale oproti operačnímu zesilovači má menší zisk. U proudového konvejořu se využívá označení znaménkem +, - nebo +/- . Tyto znaménka určují, jak je orientovaná výstupní svorka Z. U označení +/- jsou vytvořeny dvě svorky Z_+ a Z_- .

Diferenční rozdílový proudový konvejoř (DDCC) Obr. 3-2 je konstruovaný jako šestibran. Obsahuje tři vysoko impedanční napěťové vstupy Y_{1+} , Y_{2-} a Y_{3+} .



Obr. 3-2: schématická značka DDCC

Potom má jeden nízko impedanční vstup X a dva vysoko impedanční proudové výstupy Z_{1+} a Z_{1-} .

Vztahy mezi jednotlivými bránami:

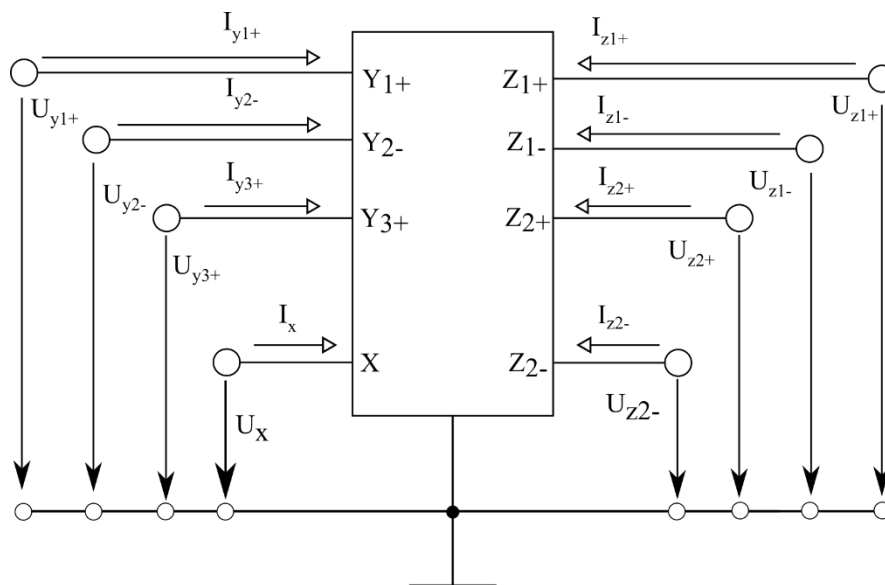
$$U_x = U_{y1+} - U_{y2-} + U_{y3+} ,$$

$$I_{y1+} = I_{y2-} = I_{y3+} = 0 , \quad I_{z1+} = I_x , \quad I_{z1-} = -I_x$$

3.2 Univerzální proudový konvektor (UCC)

Univerzální proudový konvektor (Universal Current Conveyor), který byl vytvořen jako univerzální konvektor, pomocí kterého lze realizovat všechny známé typy tříbranových a některé nové vícebranové proudové konvejory první třídy, tedy ty konvejory s jednou bránou X. Při návrhu a simulaci byl použitý UCC-N1B, který nahradil pravé prvky.

UCC je konstruovaný jako osmibran. Má tři vstupní brány Y_{1+} , Y_{2-} , Y_{3+} . Dále obsahuje jednu proudovou svorku X a čtyři brány jako proudový výstup Z_{1+} , Z_{1-} , Z_{2+} , Z_{2-} .

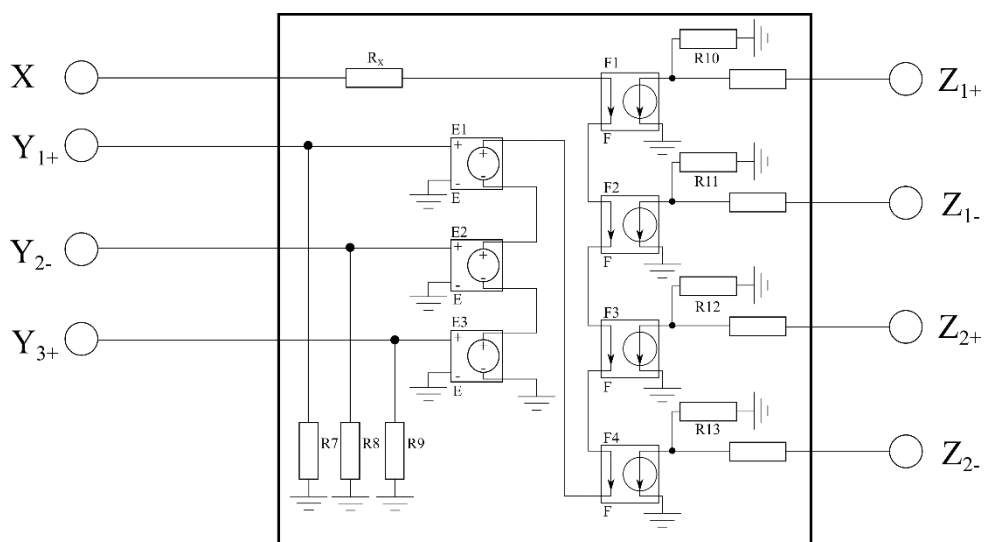


Obr. 3-3: schématická značka UCC

Vyjádření základních přenosových vlastností UCC:

$$U_X = U_{Y1} - U_{Y2-} + U_{Y3+} ,$$

$$I_{z1+} = I_{z2+} = I_X , \quad I_{z1-} = I_{z2-} = -I_X , \quad I_{Y1+} = I_{Y2-} = I_{Y3+} = 0 ,$$



Obr. 3-4: Zjednodušená vnitřní struktura UCC

4 REALIZACE NAVRHNUTÝCH FILTRŮ

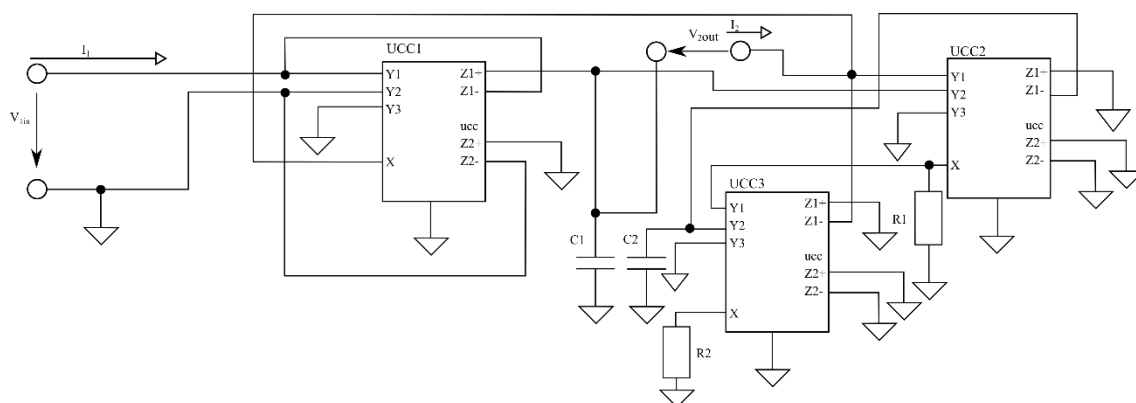
4.1 Návrh pseudo-diferenčního filtru horní propusti pracující v napěťovém režimu

Návrh prvního zapojení pseudo-diferenčního filtru pracuje v proudovém režimu za použití tří UCC konvektorů. Schéma obsahuje dva uzemněné rezistory R_1 a R_2 , které slouží k nastavení mezního kmitočtu f_m . Kdy R_1 je připojeno do svorky X v UCC2 a dále pak na vstup Y_1 na UCC3, R_2 je následně připojeno na svorku X na UCC3. Na vstup Y_{1+} a Y_{2-} konvektoru UCC1 je přiveden vstupní diferenční signál.

4.1.1 Přenosová funkce filtru horní propust

Pro ideální vlastnosti použitých prvků můžeme diferenční výstupní proud popsat následující rovnicí:

$$I_{HP} = \frac{p^2(R_2C_1R_1C_2)}{p^2(R_2C_1R_1C_2) + p(R_1C_2) + 1}$$



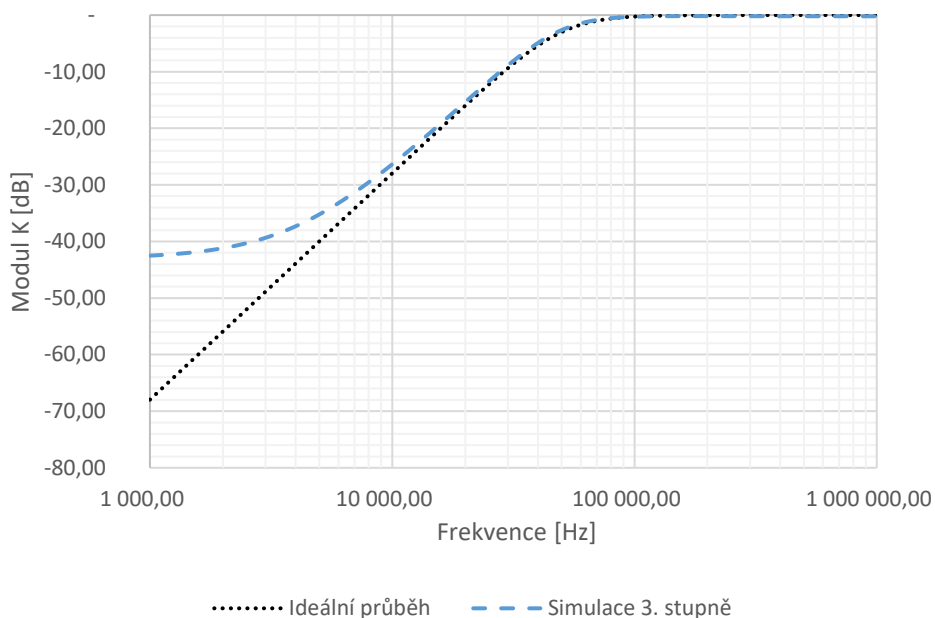
Obrázek 4-1: Schéma návrhu pseudo-diferenčního filtru typ HP

Činitel jakosti Q a úhlový kmitočet ω_0 můžeme z rovnice odvodit následovně:

$$Q = \sqrt{\frac{R_1C_2}{R_2C_1}}$$

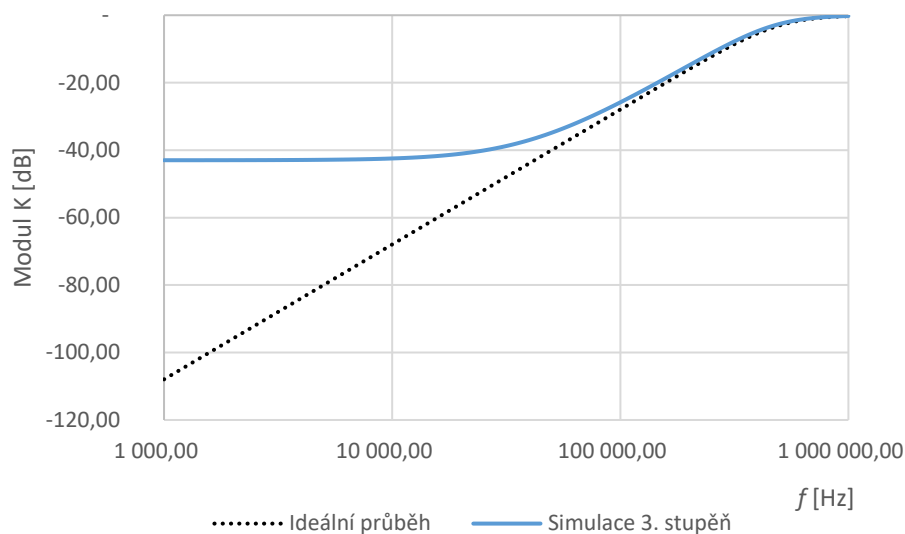
$$\omega_0 = \sqrt{\frac{1}{C_1C_2R_1R_2}}$$

Pro provedení počítačové simulace v OrCadu byl zvolen mezní kmitočet $f_0 = 50 \text{ kHz}$ a činitel jakosti $Q = 0,707$. Hodnoty kondenzátoru $c_1 = c_2 = 1 \text{ nF}$ a dopočítané rezistory $R_1 = 4502 \text{ } \Omega$ a $R_2 = 2250 \text{ } \Omega$. Pro simulaci byl použit konvektor třetí generace UCC-3L. Výsledek simulace popisuje graf níže.



Obr. 4-2: Graf simulace horní propusti při ideálním průběhu a simulace třetí úrovně

Pro druhý návrh byl zvolen mezní kmitočet 500 kHz . Rezistory zůstaly se stejnou hodnotou, a to $R_1 = 4700 \text{ } \Omega$ a $R_2 = 2200 \text{ } \Omega$. Mezního kmitočtu 500 kHz se dosáhlo změnou kondenzátorů c_1 a c_2 . V tomto návrhu se hodnota kondenzátů změnila na $c_1 = c_2 = 0,1 \text{ nF}$. Výsledný graf ideálního průběhu a průběh simulace 3. stupně lze vidět na Obr. 4-3.

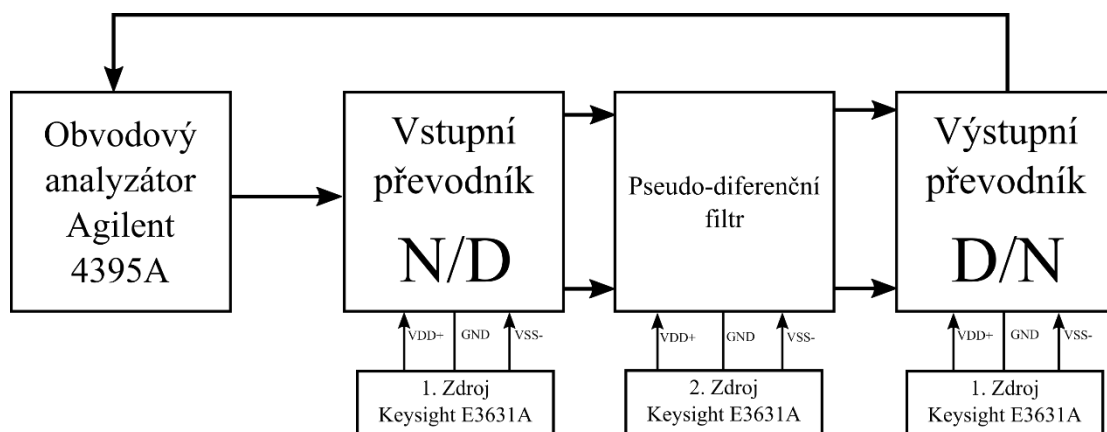


Obr. 4-3: Graf simulace horní propusti při ideálním průběhu a simulace třetí úrovně pro mezní kmitočet 500 kHz

5 PRAKTICKÉ MĚŘENÍ

V praktické části měření byl zvolený pseudo-diferenční filtr typu horní propust popsáný v kapitole 4.1. Navrhnutý pseudo-diferenční filtr druhého řádu typu horní propust používá tři aktivních prvků. Všechny aktivní prvky jsou univerzální proudové konvejory typu UCC. Jak již bylo zmíněno v předešlé kapitole pro teoretickou simulaci byl zvolen program OrCad s využitím univerzálního proudového kovejoru třetí generace UCC-3L. Výsledky simulace znázorňuje graf na Obr. 4-2: *Graf simulace horní propusti při ideálním průběhu a simulace třetí úrovně*. Cílem praktického měření je ověřit chování filtru s použitím reálných součástek a následné porovnání s teoretickými od simulovanými výsledky. Dále se měřili parametry PSRR, CMMR a celkové harmonické zkreslení (THD).

Jelikož jde o pseudo-diferenční filtr bylo potřeba pro praktické měření uzpůsobit vstup a výstup pro měření. Proto bylo potřeba převést nediferenční vstupní napětí na diferenční. K tomu posloužil vstupní převodník, který byl zkonstruován pomocí integrovaného obvodu AD8476 [16] spolu s kombinací s integrovaným obvodem AD8271, který slouží jako sumační zesilovač pro přivedení souhlasného napětí U_{COM} . Souhlasné napětí zde bylo potřeba k ověření správné činnosti diferenčního zapojení, kdy má dojít k potlačení souhlasného signálu. Na výstupu je potřeba napětí naopak převést z diferenčního na nediferenční, aby mohlo proběhnout měření. K tomu posloužil integrovaný obvod AD8429[17]. Blokové schéma měření je zobrazeno na *Obr. 5-1: Blokové schéma měření*. Všechny desky byly navrženy v programu Eagle 9.1.1. Schéma zapojení, použité prvky a dodatečná dokumentace jsou v příloze.



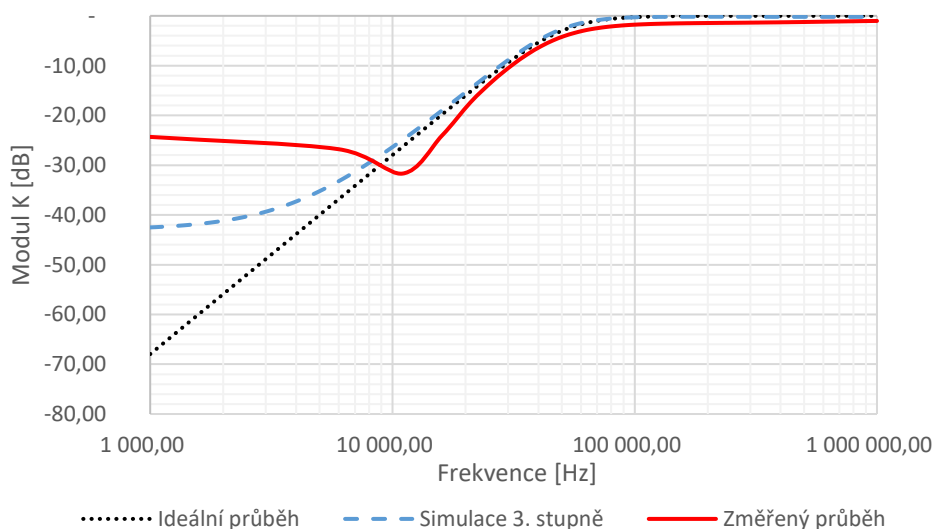
Obr. 5-1: Blokové schéma měření

Měření probíhalo na analyzátoru Agilent 4395A. Analyzátor byl nastavený na měření v rozsahu od 1kHz do 1MHz, vstupní signál (výstup z analyzátoru) měl nastavenou hodnotu 0 dBm a šířka pásma měla nastavenou hodnotu 30 Hz. Vstupní a výstupní převodník byl napájen +5V / -5V / GND zdrojem Keysight E3631A. Druhý zdroj Keysight E3631A sloužil k napájení měřeného pseudo-diferenčního filtru, kdy bylo na výstupních svorkách nastaveno +1,65V / -1,65V / GND.

5.1 Měření a simulace pseudo-diferenčního filtru pracujícího v napět'ovém režimu.

Měřený filtr typu horní propust byl realizován třemi univerzálními proudovými konvejory UCCX-N1B, které při konstrukci byly aktivními prvky filtru. Nevyužité piny konvejeoru byly uzemněny. Návrh je dále doplněn čtyřmi pasivními prvky a to kondenzátory (C_1 , C_2) a dvěma rezistory (R_1 , R_2). Filtr je navrhnutý pro mezní kmitočet $f_0 = 50$ kHz s činitelem jakosti $Q=0,707$. Hodnoty kondenzátorů jsou $C_1=C_2=1$ nF. Rezistory vypočítané v kapitole 4.1 určující mezní kmitočet byly nahrazeny hodnotami z prodejní řady a to $R_1=4700\ \Omega$ a $R_2=2200\ \Omega$.

Pro porovnání teoretických hodnot ze simulace a praktického měření je určen následující obrázek *Obr. 5-2: Modulová charakteristika pseudo-diferenčního filtru horní propust* s grafem obsahujícím všechny 3 průběhy v sobě (ideální průběh, simulace třetího stupně a změřený sestrojený filtr).

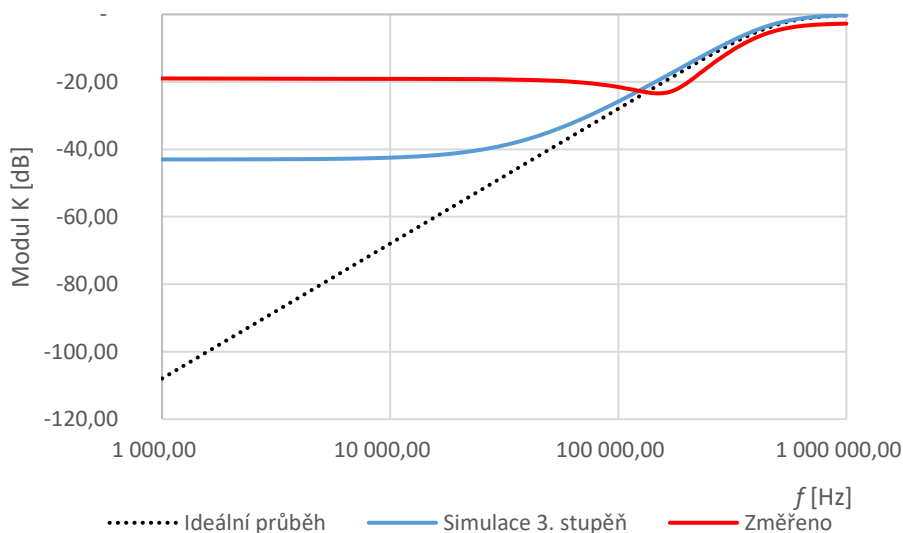


Obr. 5-2: Modulová charakteristika pseudo-diferenčního filtru horní propust pro 50 kHz

Na základě měření lze z grafu modulu *Obr. 5-2* vyčíst rozdílnosti jak mezi experimentálním měřením a simulací třetího stupně, tak i ideálním průběhem. Mezní kmitočet f_0 byl zvolen 50 kHz, takže v tomto bodě by měl být pokles -3 dB. A strmost by

měla dosahovat -40 dB/dekáda. Z výsledku měření jsme zjistili, že pokles na f_0 je -4,1 dB. Ovšem poklesu -40dB/dek. se nepodařilo dosáhnout. Největšího poklesu bylo dosaženo na děkádě 10kHz – 100kHz a to -31dB/dek. Signál na měřeném filtru v propustném pásmu byl lehce tlumen. Od mezního kmitočtu se útlum zmenšoval, ale nedosáhl 0 dB a od 100kHz do 1MHz ustáloval až skončil průběh na konstantním útlumu -1 dB.

Změny mezního kmitočtu na 500kHz se dosáhlo pomocí výměny kondenzátorů C_1 a C_2 na hodnotu 0,1nF. Výsledek popisuje červenou čarou graf. Obr. 5-3 Obvod měl rezistory $R_1=4700$ a $R_2 2200$. Výsledek je obdobný jako při prvním měření. Očekávaný pokles o 40 dB/dek se nedostavil.



Obr. 5-3 Modulová charakteristika pseudo-diferenčního filtru pro mezní kmitočet 500 kHz

Tyto nesrovnalosti mohly být způsobeny parazitními vlastnostmi zvolených aktivních prvků, vstupními/výstupními převodníky, či nevhodným návrhem cest a propojení na DPS.

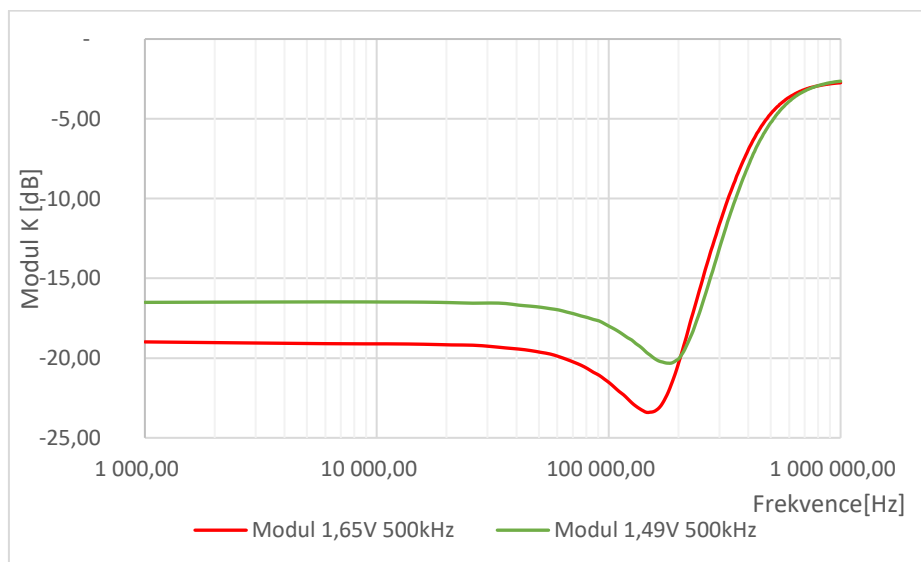
5.1.1 Porovnání modulů při poklesu napájení PSRR

Cílem této části měření bylo zjistit chování konveje UCC-N1B při poklesu napájecího napětí. Z požadovaných 1,65V se snížilo napájení na 1,55V.



Obr. 5-4: Graf modulu při poklesu napájení při $f_0 = 50\text{kHz}$

Z grafu lze vyvodit, že při poklesu napájecího napětí, nepatrně klesnul maximální útlum z -31,69 dB na -32,62 dB. Dále je možné z grafu říct, že v počátečním spektru do 10kHz došlo ke zlepšení průběhu útlumu.

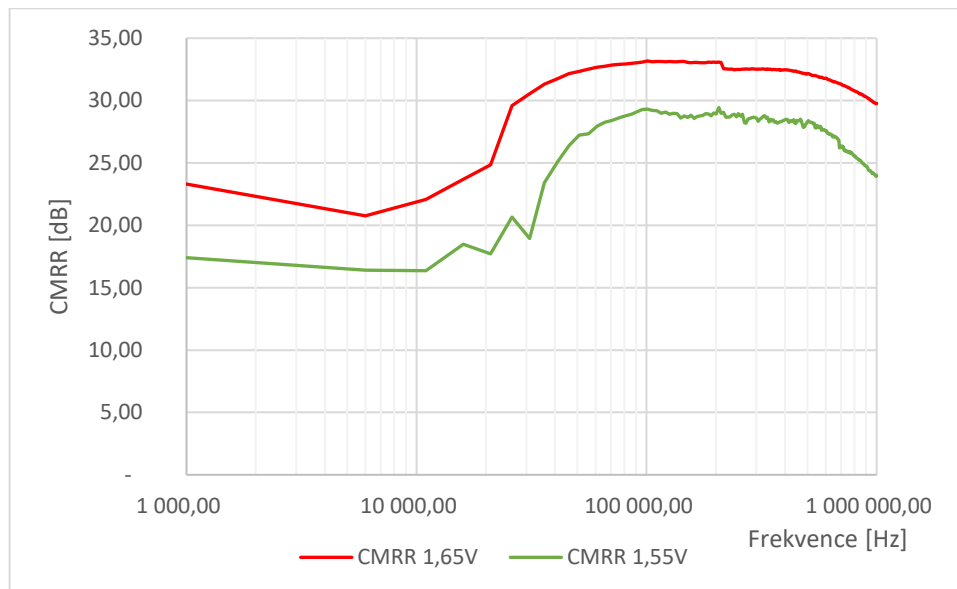


Obr.5-5: Graf modulu při poklesu napájení při $f_0 = 500\text{kHz}$

Z grafu pro mezní kmitočet $f_0 = 500\text{kHz}$, lze vidět, že je dosaženo maximálního útlumu pouze -23,41 dB a při poklesu napájení dojde ještě ke zhoršení vlastností a maximální útlum dosahuje jen -20,25 dB.

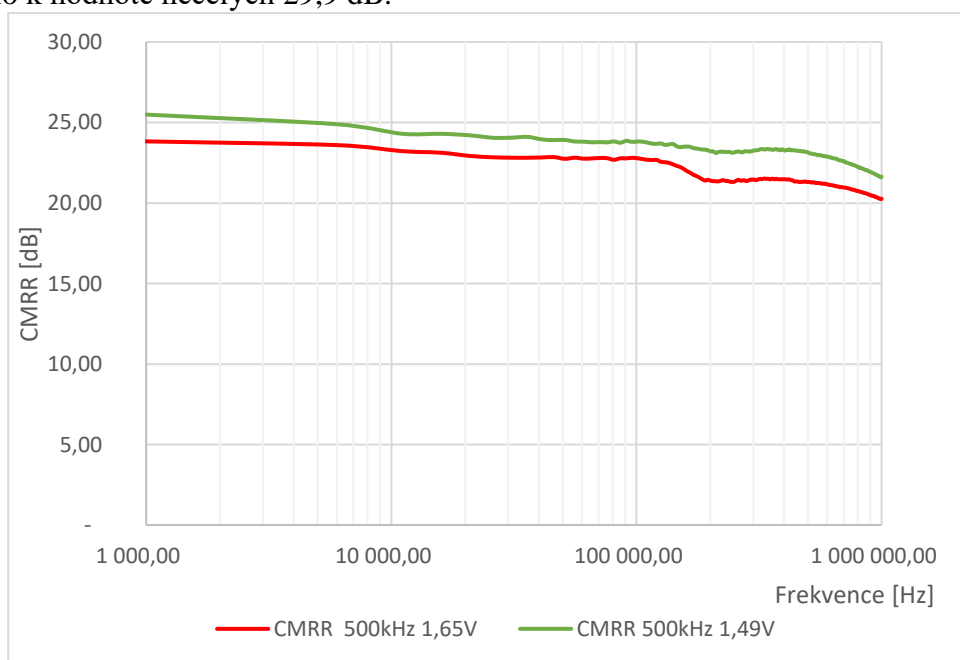
5.1.2 Měření CMRR

Tato část měření se zabývala zjištěním potlačení CMRR při napájení konvektorů 1,65V a při poklesu napájení na 1,55V.



Obr. 5-6: Graf CMRR při mezním kmitočtu $f_0=50$ kHz

Jak ukazuje graf, dosažené CMRR při napájení 1,65V dosahuje maximálně necelých 33 dB. Při poklesu napájení na 1,55V zůstává průběh dost podobný jako při optimálním napájení jen se síla potlačení posunula o 4-6 dB níže. I tak se ale CMRR dostalo k hodnotě necelých 29,9 dB.



Obr. 5-7: Graf CMRR při mezním kmitočtu $f_0=500$ kHz

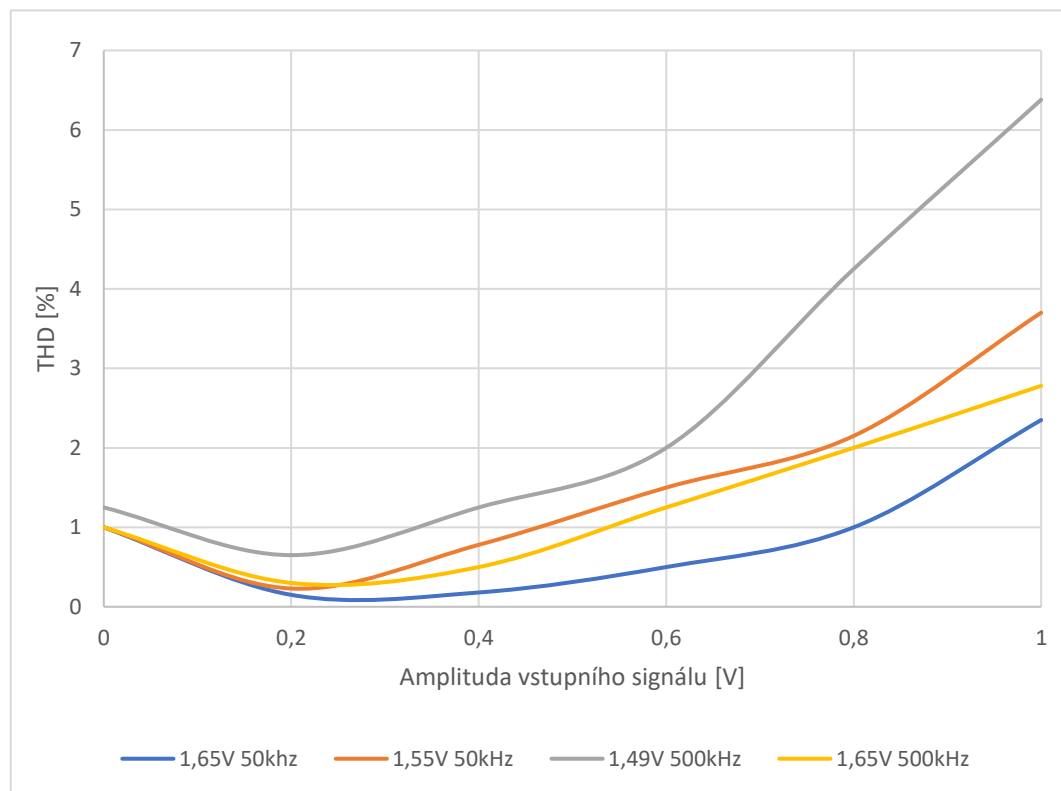
Při mezním kmitočtu $f_0=500$ kHz vychází průběh CMRR konstantněji, ale s menším maximálním potlačením, které dosahuje při optimálním napájení 23,8 dB a pak pozvolně klesá, kdy při kmitočtu 1 MHz dosahuje 20,27 dB. Při potlačení vstupního napájení na 1,49V podává navržené řešení lepší výsledky a dosahuje maximálního útlumu 25,49 dB a pozvolně klesá až na 21,65 dB při kmitočtu 1 MHz. V tomhle směru návrh není ukázkou příliš funkčního řešení. Pro dosažení úspěšného výsledku by bylo potřeba pohybovat se s CMRR na 40 dB a více.

5.1.3 Měření celkového harmonického zkreslení.

Měření celkového harmonického zkreslení neboli THD, bylo provedeno jak pro optimální, tak i snížené napájecí napětí. Měření probíhalo na prvních pěti harmonických složkách U_1-U_5 při frekvenci 1kHz.

THD je definováno jako poměr vyšších harmonických složek k základní:

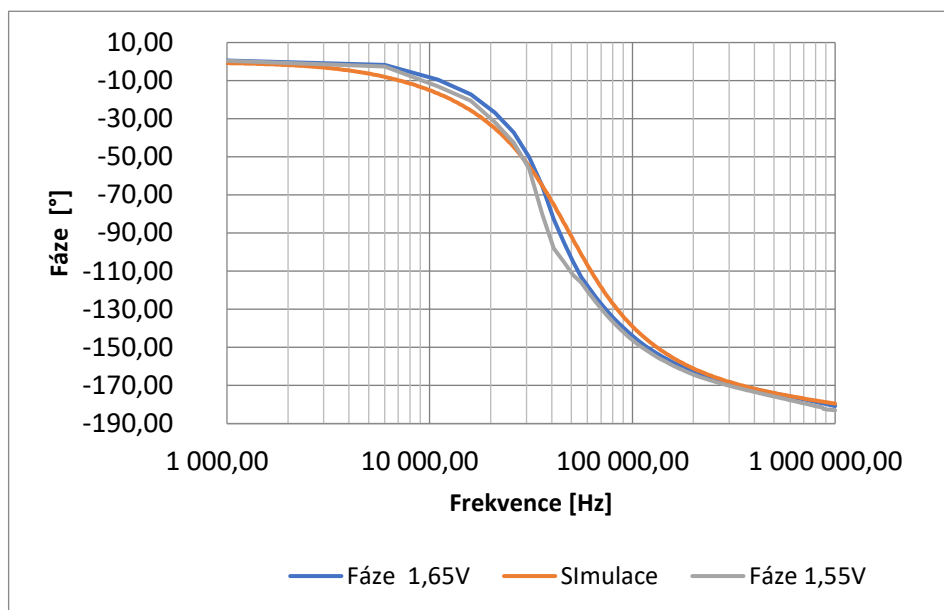
$$THD = \frac{\sqrt{U_2^2 + U_3^2 + \dots + U_n^2}}{U_1}$$



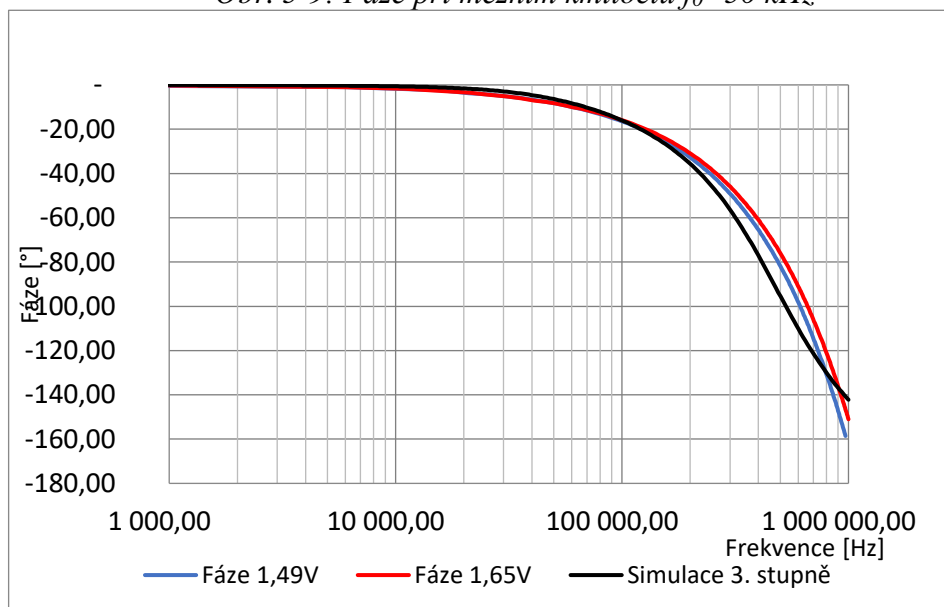
Obr. 5-8: Graf průběhu THD pro mezní kmitočty 50 kHz / 500 kHz

Z Obr. 5-8 vyplívá, že pseudo-diferenční filtr při mezním kmitočtu $f_0=50$ kHz a amplitudě vstupního signálu 1 V dosahují celkového harmonického zkreslení 2,35 % a při potlačení vstupního napájení kolem 2,7 %. Pseudo-diferenční filtr s mezním kmitočtem $f_0=500$ kHz a vstupní amplitudou signálu 1 V má celkové harmonické zkreslení 3,7 % při optimálním napájení a po potlačení vstupního napájení se celkové harmonické zkreslení na 1 V propadne až na 6,38%

5.1.4 Měření fáze



Obr. 5-9: Fáze při mezním kmitočtu $f_0=50$ kHz



Obr. 5-10: Fáze při mezním kmitočtu $f_0=500$ kHz

6 ZÁVĚR

Bakalářská práce byla zaměřena na téma návrh funkční pseudo-diferenčních struktury a využití poznatků o konstrukci těchto filtrů. Hlavním tématem bylo navrhnout vlastní pseudo-diferenční filtr, podrobit návrh simulaci, sestavit a poté podrobit měření a vyhodnotit jeho vlastnosti z hlediska zkreslení signálu, potlačení souhlasné složky (CMRR) a potlačení napájecího napětí (PSRR).

Na začátku práce jsem se zabýval teoretickým popisem kmitočtových filtrů, jejich dělení a využitím. Seznámení se selektivními filtry a jejich matematickým výpočtem. V 2. kapitole jsem se zabýval pseudo-diferenční strukturou, jak se tvoří a jaké má vlastnosti. A popsal i struktury z kterých vychází, tedy nediferenční a plně diferenční. Třetí kapitola je o seznámení s konvejory a jejich využití v praxi.

Čtvrtá kapitola se zabývá přímým návrhem v programu SNAP. Kde jsem sestavil horní propust. Po ověření matematické rovnosti s horní propustí, jsem filtr sestavil v simulačním programu OrCad. Zde jsem provedl simulaci s ideálními modelem konvejořů a poté simulaci třetího stupně, kdy model konvejořů počítá se složitější vnitřní strukturou, která se již blíží reálnému obvodu. Simulace jsem provedl pro moduly při mezních kmitočtech 50 kHz / 500 kHz a poté jejich fázi. Po ověření pomocí simulací jsem obvod sestavil. Návrh desky je přiložen v příloze.

V páté kapitole jsem se zabýval experimentálním měřením na mnou vyrobeném filtru a porovnání vlastností s teoretickými hodnotami a se simulacemi. Měření probíhalo pro mezní kmitočty $f_0 = 50$ kHz a mezní kmitočet $f_0 = 500$ kHz. První jsem provedl měření modulu a porovnal jsem výsledky s ideálním průběhem a simulací třetího stupně. Při mezním kmitočtu 50 kHz jsem zjistil, že maximální útlum je -31,69 dB. Útlum v mezním kmitočtu dosahuje -4 dB a celkově je průběh signálu utlumen o -1 dB, protože po průběhu mezním kmitočtem se signál nedostal do 0 dB. Při mezním kmitočtu 500 kHz byl výsledek o něco horší, tam maximální útlum dosáhl pouze -23,39 dB a taktéž byl celkový průběh utlumen a nedosáhl 0 dB.

Další měření bylo potlačení vstupního napájení. Zde jsme chtěli provést potlačení o 10 %, ale to se podařilo jen u mezního kmitočtu 500 kHz, kde jsme dosáhli 1,49V. U mezního kmitočtu 50 kHz neprojevoval filtr funkčnost, a proto jsme přidávali vstupní

napětí a skončili tak u 1,55V, což odpovídá 6 %. Při mezním kmitočtu potlačení vstupního napětí zhoršilo vlastnosti filtru, ale u $f_0=50$ kHz se po potlačení vstupního napětí funkčnost lehce zlepšila. Zmenšil se skok u modulu na nízkých kmitočtech a zvětšil se maximální útlum. Při pozorování grafů bych řekl, že počáteční chování filtru v nízkých spektrech způsobují využití konvejory.

Poté následovalo měření potlačení souhlasné složky CMRR. Při mezním kmitočtu 50 kHz bylo dosaženo potlačení 33 dB při optimálním napájení 1,65V a potlačení 29,9 dB při 1,55V. Ovšem průběh potlačení není ideální a v pásmu nepropustnosti filtru je potlačení stejnosměrné složky menší. U měření s mezním kmitočtem 500 kHz byl průběh potlačení o poznání stálější, ale dosahoval menšího potlačení než u $f_0=50$ kHz. Při optimálním napájení 1,65V dosahovalo potlačení CMRR 23,8 dB. Po aplikaci PSRR kdy vstupní napětí bylo nastaveno na 1,49V se průběh CMRR zlepšil a zvýšilo se potlačení na 25,49 dB. Z tohoto měření vyplívá, že sestrojený filtr nedosahuje kvalit a výhodnosti pro kterou byl konstruován. Pro dosažení úspěšného výsledku by bylo potřeba pohybovat se s CMRR na 40 dB a více.

Po měření CMRR následovalo měření THD, z kterého lze vyčíst, že při optimálním napájení dochází k menšímu harmonickému zkreslení. Jakmile potlačíme napájení zvýší se harmonické zkreslení. V našem případě to bylo podle napětí vstupní na vstupní amplitudě dvakrát až třikrát oproti optimálnímu napájení.

A v poslední fázi jsme změřili a porovnali fáze, které podle grafů vychází dost blízko k těm od simulovaným.

Navržený a sestrojený filtr funguje ovšem nedosahuje výhod, kterých se při návrhu a simulaci očekávalo. Výchyly od simulovaných hodnot či ideálních průběhů mohou být způsobeny různými prvky. Jak již samotným návrhem, tak výběr součástek. Případné narušení mohou mít i vstupní a výstupní převodníky.

LITERATURA

- [1] DAVIS.N, *An Intruduction to Filters* [online], Internetový článek, vydán 31.7.2017 [cit. 25.5.2019]. Dostupné z : <https://www.allaboutcircuits.com/technical-articles/an-introduction-to-filters/>
- [2] KOTON, J a VRBA, K. *Filtrační analogové obvody pro integrovanou výuku VUT a VŠB-TUO*, FEKT VUT v Brně 2014
- [3] ŽATKOVIČ, A.; Alzat SZM: Frekvenční selektory. Dostupné z: http://alzat.szm.com/selektory/frekvenc/frek_sel.htm
- [4] SCHIMMEL, J. *Studiová a hudební elektronika*, FEKT VUT v Brně 2015
- [5] ALL ABOUT CIRCUITS: *Low-pass Filters* [online]. Poslední aktualizace 1.5.2019 [cit. 24.5.2019]. Dostupné z: <https://www.allaboutcircuits.com/textbook/alternating-current/chpt-8/low-pass-filters/>
- [6] ALL ABOUT CIRCUITS: *High-pass Filters*[online]. Poslední aktualizace 1.5.2019 [cit. 24.5.2019]. Dostupné z: <https://www.allaboutcircuits.com/textbook/alternating-current/chpt-8/high-pass-filters/>
- [7] ALL ABOUT CIRCUITS: *Band-pass Filters* [online]. Poslední aktualizace 1.5.2019 [cit. 24.5.2019]. Dostupné z: <https://www.allaboutcircuits.com/textbook/alternating-current/chpt-8/band-pass-filters/>
- [8] ALL ABOUT CIRCUITS: *Band-stop Filters* [online]. Poslední aktualizace 1.5.2019 [cit. 24.5.2019]. Dostupné z: <https://www.allaboutcircuits.com/textbook/alternating-current/chpt-8/band-stop-filters/>
- [9] PETRŽELA, J.; *Elektircké filtry*[online], Počítačová prezentace. 21.12.2009 [cit. 24.5.2019] Dostupná z: <http://www.urel.feec.vutbr.cz/MTEO/belf/fazovaci%20clanky.pdf>
- [10] Analogová technika počítačové cvičení úloha 2: *Kmitočtový filtr*. FEKT VUT v Brně
- [11] Maxim integrated: *Understanding Single-Ended, Pseudo-Differential and Fully-Differential ADC Inputs*. [online] Poslední aktualizace 14.6.2002 [cit 24.5.2019], Dostupné z: <https://www.maximintegrated.com/en/app-notes/index.mvp/id/1108>
- [12] KOTOT, J.; SLÁDOK, O.; HERENCŠÁR, N.; HORNG, J. *Pseudo-differential second-order band-reject filter usinf current conveyors*. AEU – International Journal of Electronics and Communications, 2016, roč. 70, č. 6, s. 814-821. ISSN:1434-8411

- [13] *Common-mode rejection ratio*. Elektronický časopis. Dostupné z: <https://encyclopedia.thefreedictionary.com/Common-mode+rejection+ratio>.
- [14] *Power supply rejection ratio*. Elektronický časopis. Dostupné z: <http://encyclopedia.thefreedictionary.com/Power+Supply+Rejection+Ratio>.
- [15] UCC-N1B: Universal current conveyor(UCC) and Second-Generation currentconveyor (CCII+/-).
- [16] AD 8476: Low Power, Unity Gain Fully Differential Amplifier and *ADC Driver*. Datasheet, Analog Devices [online], 2011. Dostupné z: <<http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/AD8476.pdf>>.
- [17] AD 8429: 1 nV/Hz Low Noise Instrumentation Amplifier. Datasheet, Analog Devices [online], 2011. Dostupné z: <http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/AD8429.pdf>.

SEZNAM SYMBOLŮ, VELIČIN A ZKRATEK

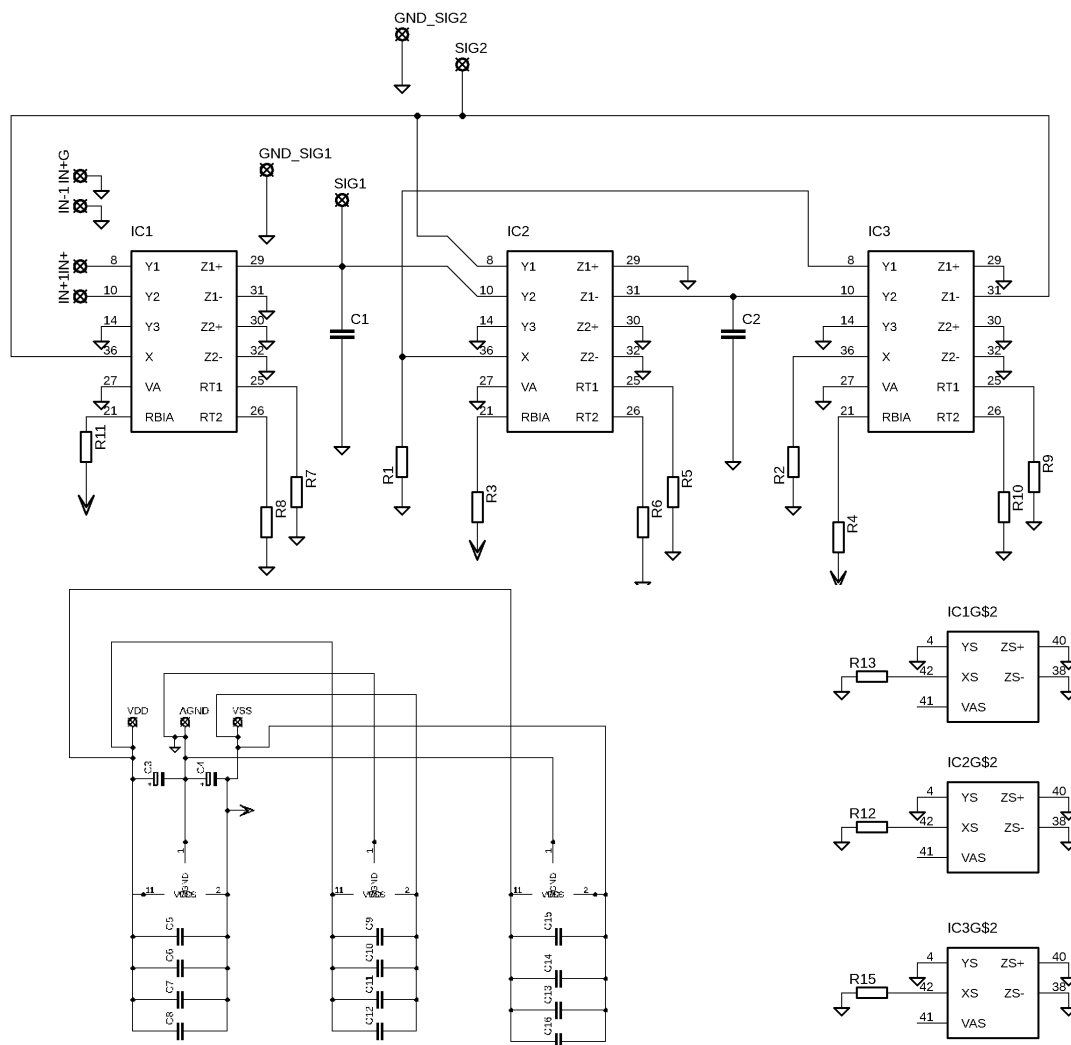
LP	dolní propust (Low-Pass)
HP	horní propust (High-Pass)
BP	pásmová propust (Band-Pass)
BR	pásmová zádrž (Band-Reject)
AP	fázovací článek (All-Pass)
U_x	napětí na uzlu X [V]
U_y	napětí na uzlu Y [V]
U_z	napětí na uzlu Z [V]
U_{in}	vstupní napětí [V]
U_{out}	výstupní napětí [V]
I_1	proud na vstupu [A]
I_2	proud na výstupu [A]
I_x	proud na uzlu X [A]
I_y	proud na uzlu Y [A]
I_z	proud na uzlu Z [A]
ω_0	úhlová frekvence [s ⁻¹]
f_0	mezní kmitočet [Hz]
K_U	přenos napětí
K_I	přenos proudu
$K(p)$	přenosová funkce
p	Laplaceův operátor
R	rezistor [Ω]
C	kondenzátor [F]
G	vodivost [S]
Q	činitel jakosti [-]
OZ	operační zesilovač
OTA	operační transkonduktanční zesilovač (operational transconductance amplifier)
BOTA	operační transkonduktanční zesilovač s diferenčním výstupem (balanced output OTA)
UCC	univerzální proudový konvektor (universal current conveyor)
DDCC	diferenční rozdílový proudový konvektor (differential difference current conveyor)
CCII	proudový konvektor druhé generace
CCIII	proudový konvektor třetí generace
Y	vstupní svorka konvektoru
X	vstupní svorka konvektoru
Z+	výstupní svorka konvektoru
Z-	výstupní svorka konvektoru
π	Ludolfovo číslo (3,1415926535 [-])
B	Šířka pásma

SEZNAM PŘÍLOH

A	Návrh zařízení	30
A.1	Deska plošného spoje – top (strana součástek).....	32
A.2	Deska plošného spoje – bottom (strana spojů)	33
A.3	Deska plošného spoje – Pohled na součástky	34

A NÁVRH ZAŘÍZENÍ

Návrh desky plošných spojů pseudodiferenčního filtru a seznam použitých součástek.

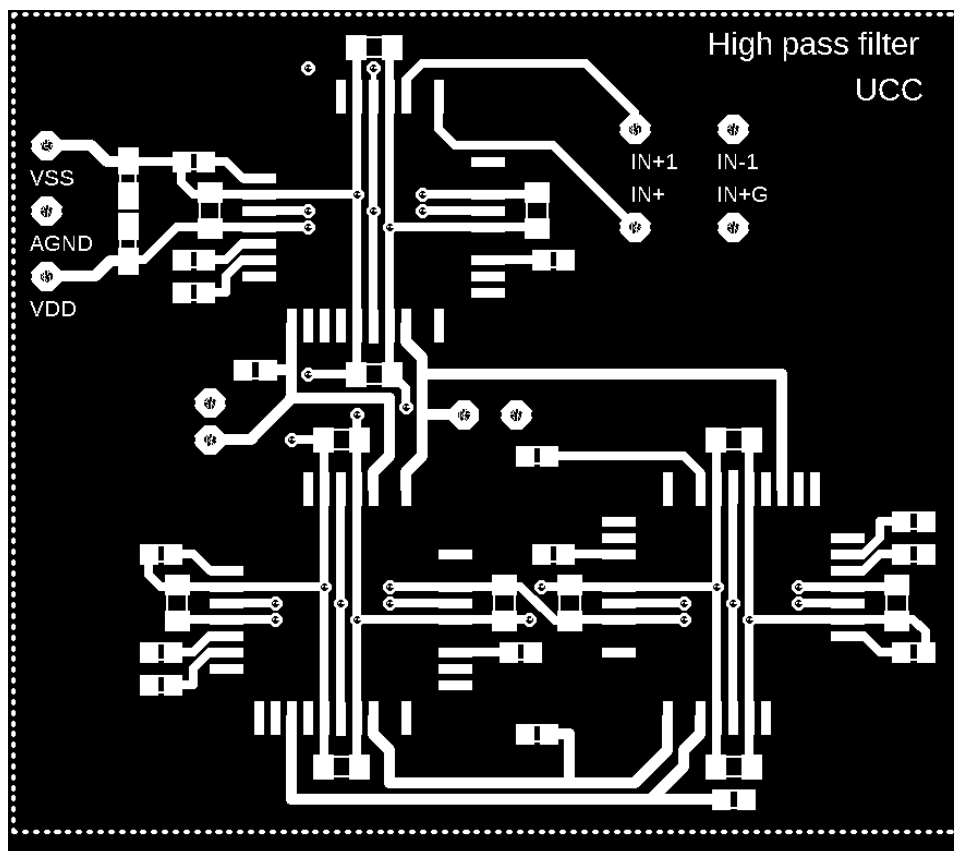


Obrázek 6-1: Schéma zapojení pseudo-diferenčního filtru

Seznam součástek:

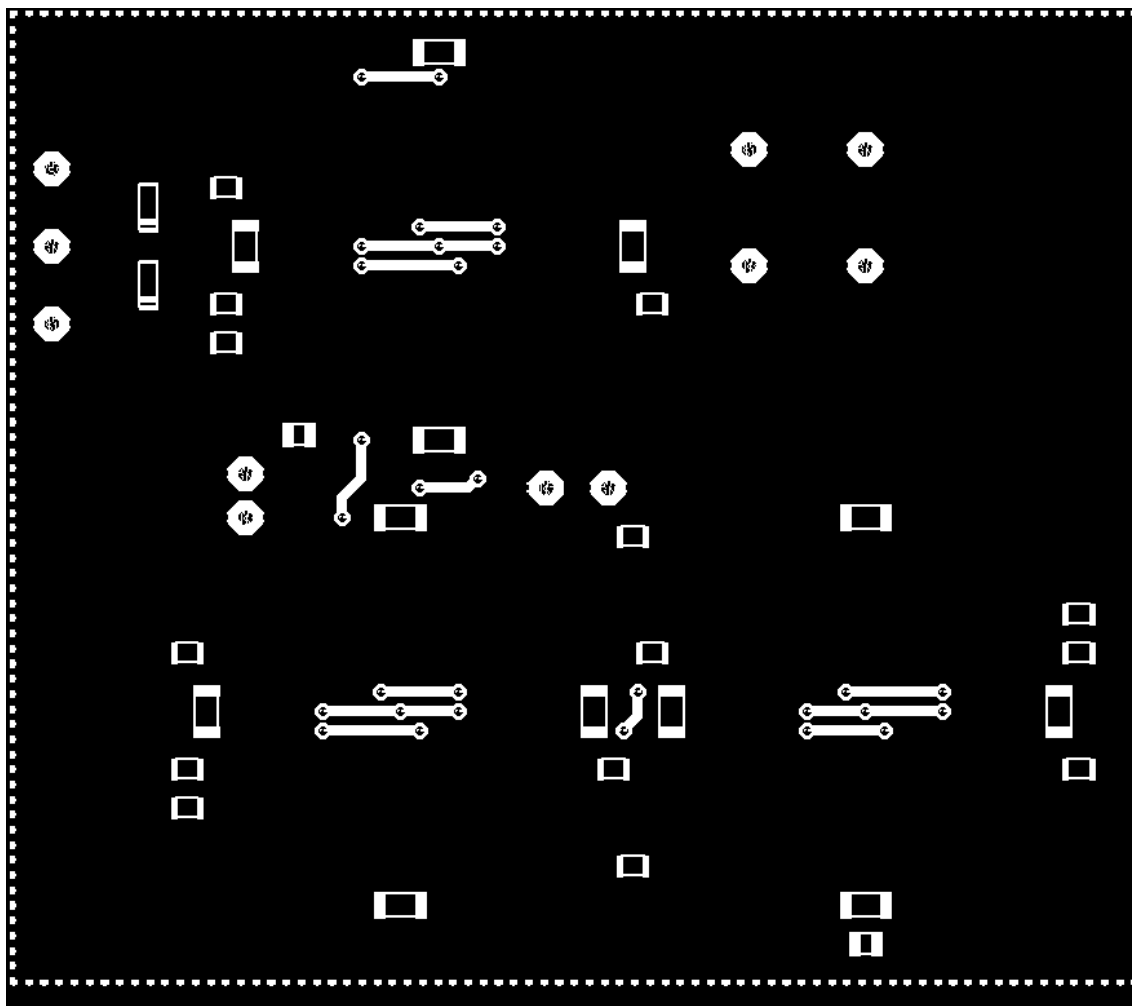
C ₃ a C ₄	A/3216-18R 3.2 x 1.6 x 1.8 4u7 F Tantalum
R _{BIA} R3, R4, R11	4k7 Ω M0805
C5, C6, C7, C8 C9, C10, C11, C12 C13, C14, C15, C16	C1206 68pF NPO 1206
C5, C6, C7, C8 C9, C10, C11, C12 C13, C14, C15, C16	C1206 47nF NPO 1206
C1	1nF / 0,1 nf C0805
C2	1nF / 0,1 nF C0805
R1 Q=0.707 f0=50 kHz	4K7 M0805
R2 Q=0.707 f0=50 kHz	2K2 M0805
RT1 R7, R5, R9	8k2 Ω M0805
RT2 R8, R6, R10	8k2 Ω M0805
R12, R13, R15	1k M0805

A.1 Deska plošného spoje – top (strana součástek)

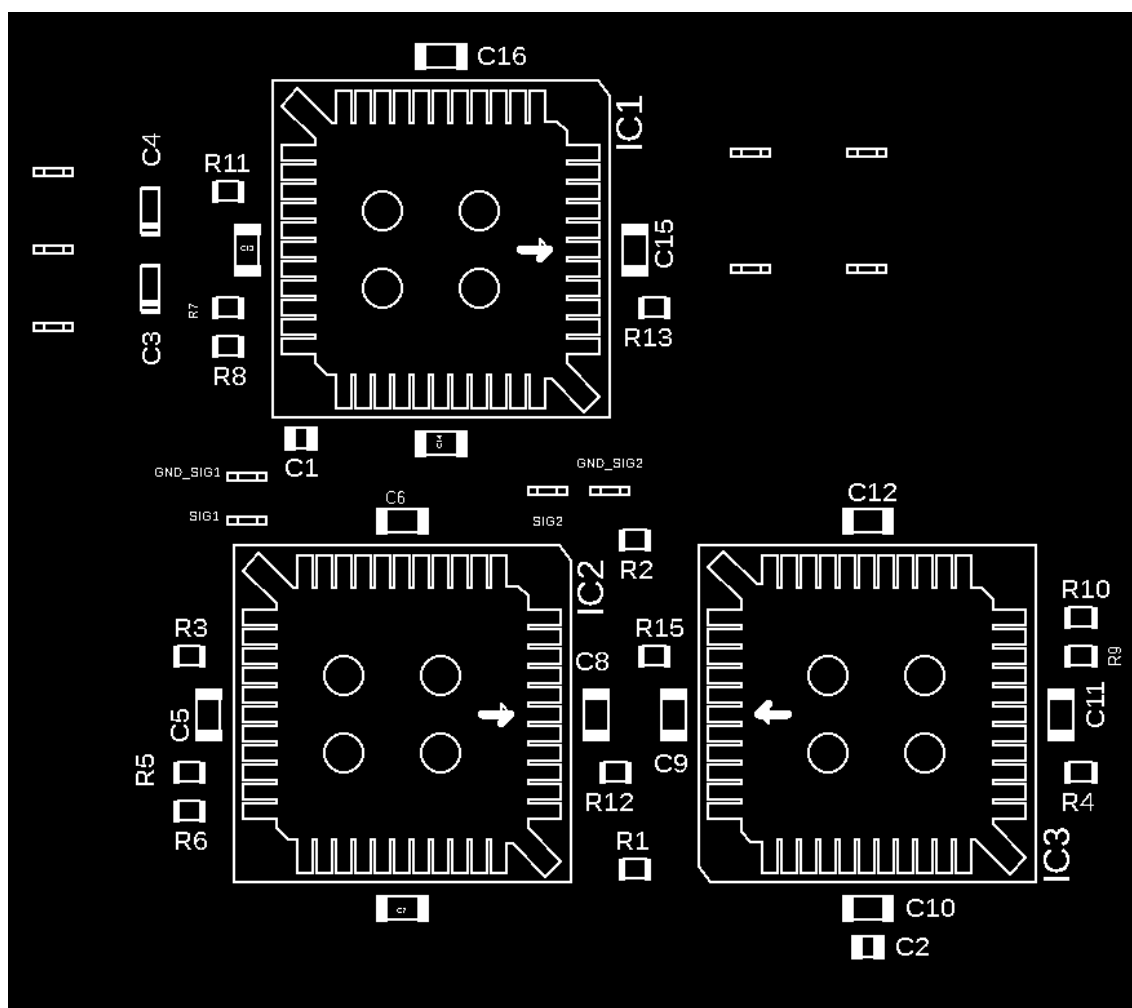


Rozměr desky **a x b** [mm], měřítko M**1:1**

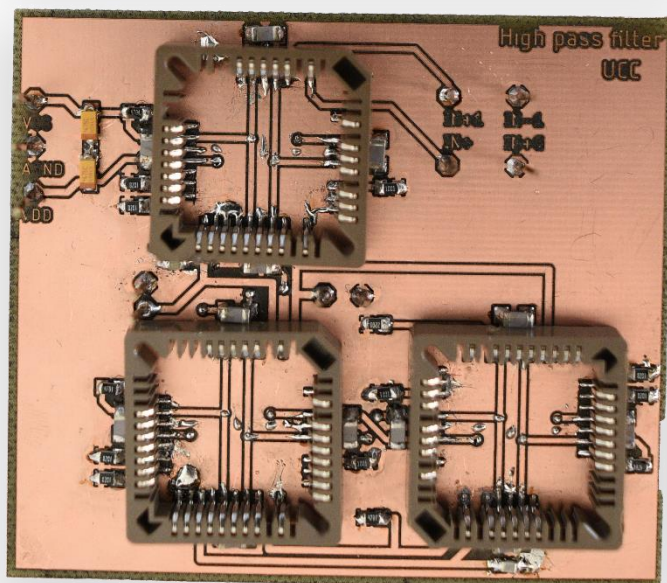
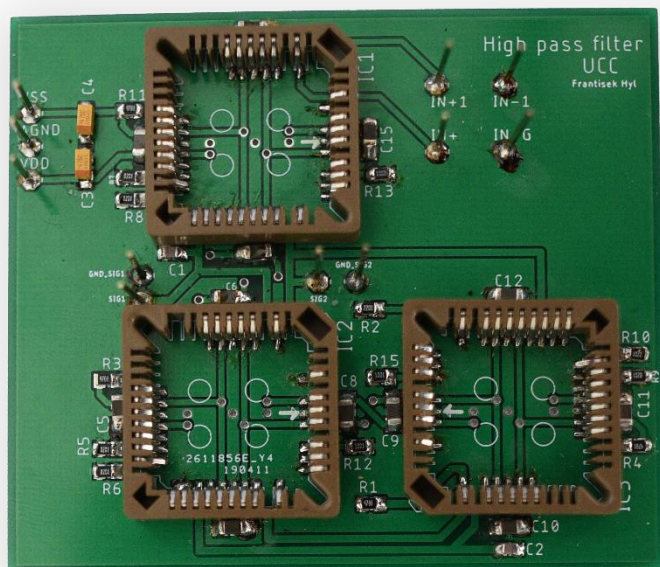
A.2 Deska plošného spoje – bottom (strana spojů)



A.3 Deska plošného spoje – Pohled na součástky



A.4 Deska plošného spoje – Vyrobená vrch



A.5 Deska plošného spoje – Vyrobená spodek

